

Рисунок 7 – Поверхня помилок поліноміального згладжування

Висновки. На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що побудова аналого-цифрового вимірювача параметрів імпульсів як єдиного апаратно - програмного комплексу дозволяє одержати повну статистичну оцінку точностних параметрів імпульсів малої тривалості, що вимірюються.

Список літератури: 1. *Т.Андерсон* Статистический анализ временных рядов. Пер.с англ. – М.: Мир, 1976. 2. *Блейхут Р.* Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. Пер. с англ. – М., Мир, 1989. 3. *Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н.* Цифровая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1990.

Надійшла до редколегії 29.10.2007

УДК 621.373:664

Л.С.ЕВДОШЕНКО, НТУ «ХПИ»

СТАРТОВАЯ СТУПЕНЬ ГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Для генератора мегавольтных импульсов створено малогабаритний (470×226×226 мм) стартовий ступінь на напругу 10 кВ з енергією, що запасється, 1,25 кДж. При розряді ступеню на нелінійне навантаження (імпульсний трансформатор с феромагнітним осердям та незарядженою ємністю у вторинній обмотці) за допомогою одного керованого розрядника зі скривленням поля фронт імпульсу напруги на навантаженні не перевищував 80 нс.

Small-sized (470×226×226 mm) starting stage on voltage 10 kV with stored energy 1.25 kJ for generator of megavolt pulses has been created. Voltage pulse front on the load during discharge of the stage into nonlinear load (pulsed transformer with ferromagnetic core and non-charged capacitance in secondary winding) with help of one controlled discharger with field distortion was less 80 ns.

Введение. Спектр применения импульсных электротехнологий весьма широк: обработка пищевых продуктов, водоподготовка, дробление бетона, озонирование, очистка сточных вод и отходящих газов и т.п. Ускоренное развитие импульсных электротехнологий в настоящее время требует создания генераторов высоковольтных импульсов с амплитудой в сотни киловольт и длительностью фронта в доли – единицы наносекунд. Причем, важное значение для технологических электроустановок (а, следовательно, генераторов импульсов) приобретают такие параметры как высокий ресурс и компактность.

Анализ источников. Недостатком схемы умножения напряжения по принципу генератора Маркса является наличие большого количества искровых разрядников, а также значительные габариты емкостных накопителей ступеней. Трансформаторные схемы умножения напряжения по сравнению с генераторами Маркса более компактны и надежны и могут работать в импульсно – периодическом режиме [1]. Поэтому при разработке данного генератора импульсов напряжения с амплитудой около 1 МВ и фронтом в доли – единицы наносекунд была выбрана схема двухступенчатого повышения напряжения с использованием в каждой ступени трансформатора Тесла (см. рис. 1). Такая схема позволяет обойтись небольшим количеством искровых разрядников, а также позволяет уменьшить габариты элементов генератора.

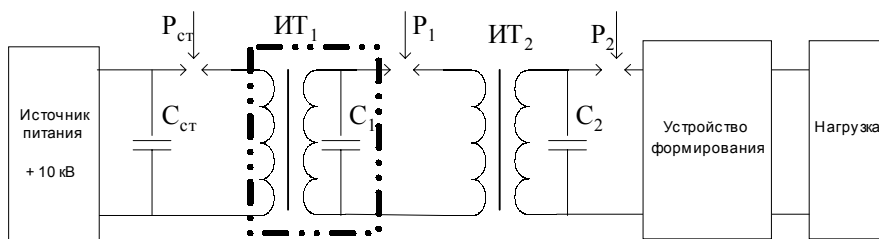


Рисунок 1 – Упрощенная схема генератора мегавольтных импульсов:

$C_{ст}, C_1, C_2$ – емкости стартовой, первой и второй ступеней генератора соответственно; $P_{ст}, P_1, P_2$ – управляемые искровые коммутаторы стартовой, первой и второй ступеней генератора соответственно; ИТ₁, ИТ₂ – импульсные повышающие трансформаторы (и.т.) первой и второй ступеней генератора

Определение направления исследований. Для эффективного повышения напряжения в каждой ступени генератора управляемые разрядники должны срабатывать в моменты, когда напряжение на емкостях ступеней близко к максимально возможному, т.е. на фронтовой части импульсов. Воздействие только фронтовой части импульсов напряжения (особенно, если длительность фронта составляет доли – единицы микросекунд [2]) на изоляцию, позволяет увеличить значение допустимой рабочей напряженности

электрического поля в элементах ступеней генератора. Это, в свою очередь, дает возможность уменьшить изоляционные расстояния в них, и тем самым снизить массо-габаритные показатели элементов и индуктивность разрядных контуров ступеней. Из тех же соображений следует стремиться к минимизации фронтов импульсов в каждой ступени повышения напряжения. Этого можно достичь при малых временах коммутации разрядников и низкой индуктивности разрядных контуров.

Таким образом, к работе искровых разрядников в составе данного генератора предъявляются следующие требования:

- стабильный разброс времени запаздывания пробоя;
- минимальное время коммутации;
- стабильность временных интервалов между управляющими импульсами разрядников ступеней.

Целью исследований при создании стартовой ступени генератора мегавольтных импульсов с фронтом в доли – единицы наносекунд являются:

- обеспечение минимального стабильного разброса времени запаздывания пробоя и минимального времени коммутации стартового разрядника;
- создание разрядного контура с низкой индуктивностью.

Конструкция ступени. В состав стартовой ступени входят емкостный накопитель $C_{ст}$ и управляемый разрядник $P_{ст}$. Стартовый накопитель $C_{ст}$ состоит из четырех последовательно соединенных пакетов, извлеченных из выпускаемых промышленностью конденсаторов К 75-40а. Каждый пакет имеет емкость 100 мкФ и рассчитан на напряжение 3 кВ. Таким образом, $C_{ст}$ имеет емкость 25 мкФ, и допустимое напряжение для него составляет 12 кВ. При зарядном напряжении 10 кВ вследствие недозаряда ресурс $C_{ст}$ больше, чем у конденсаторов К 75-40а. Пакеты $C_{ст}$ размещены в стальном корпусе (см. рис. 2). Корпусная изоляция для $C_{ст}$ по сравнению с К 75-40а усилена пятью слоями полиэтиленовой пленки толщиной 100 мкм. Удельная плотность энергии в $C_{ст}$ составляет ~ 140 Дж/дм³. Непосредственно к фланцу корпуса $C_{ст}$ с помощью шпилек М8 крепится корпус стартового разрядника $P_{ст}$. Последний представляет собой воздушный разрядник с резким искажением поля. Основные электроды $P_{ст}$ в виде стальных колец с наружным диаметром 100 мм и внутренним – 80 мм со скругленными торцами в рабочей зоне. Управляющий электрод (у.э.) выполнен в виде плоского кольца с внутренним диаметром 90 мм, наружным – 130 мм и толщиной 0,3 мм из нержавеющей стали. На внутренней кромке у.э. в восьми местах, равноотстоящих друг от друга по окружности кромки, выполнены треугольные зубцы высотой ~ 2 мм для фиксации точек инициирования пробоя. У.э. размещен точно в середине рабочего промежутка длиной 5 мм. Корпус $P_{ст}$ изготовлен из оргстекла и со-

стоит из двух одинаковых половин. Для повышения ресурса разрядника внутренняя поверхность корпуса развита за счет цилиндрического паза таким образом (см. рис. 2), что продукты эрозии электродов попадают только на небольшую часть внутренней изоляционной поверхности и не могут попасть внутрь этого паза. Длина $P_{ст}$ в направлении протекания тока составляет 55 мм, а его размеры в плане – 226×226 мм.

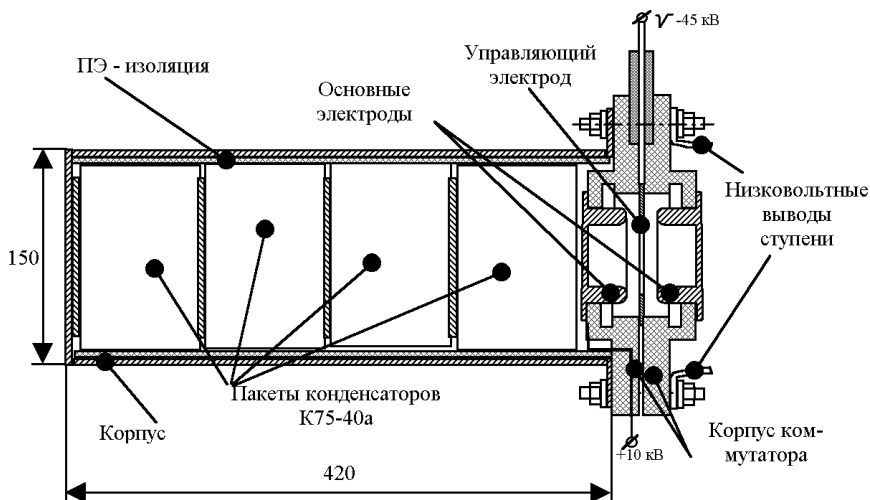
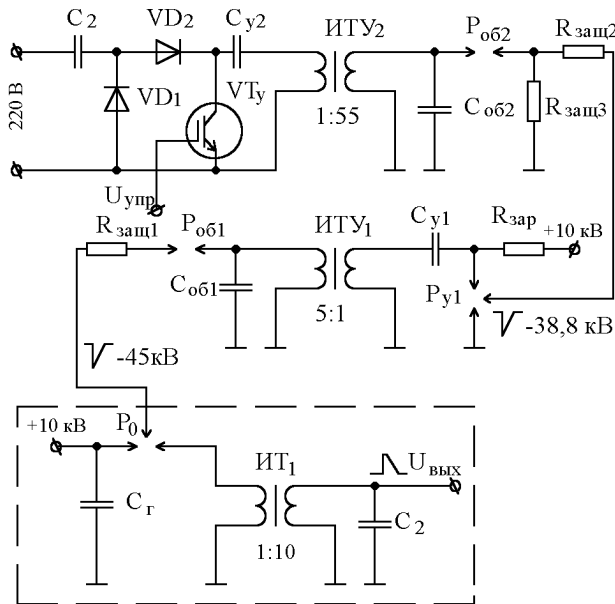


Рисунок 2 – Конструкция стартовой ступени генератора

Прямым токопроводом стартовой ступени генератора являются конденсаторные пакеты $C_{ст}$ и подключенный к последнему из них разрядник $P_{ст}$, а обратным токопроводом – охватывающий пакеты $C_{ст}$ стальной корпус и стальные шпильки, осуществляющие токоподвод к нагрузке стартовой ступени и одновременно прижимающие по периметру корпус $P_{ст}$ к фланцу корпуса $C_{ст}$. Таким образом, разрядный контур стартовой ступени представляет собой замкнутый на одном конце отрезок «коаксиальной» линии квадратного сечения, что позволяет получить небольшую по величине индуктивность контура. Габариты ступени составляют 470×226×226 мм.

Работа ступени. При работе генератора высоковольтных импульсов накопитель $C_{ст}$ заряжается от источника питания +10 кВ. Запасаемая энергия стартовой ступени составляет 1,25 кДж. После заряда $C_{ст}$ отрицательный импульс напряжения амплитудой около 45 кВ поступает из блока импульсов управления на у.э. $P_{ст}$. После его срабатывания $C_{ст}$ разряжается на первичную обмотку и.т. ИТ₁ первой ступени повышения напряжения генератора. В результате энергия стартовой ступени начинает распространяться по тракту ге-

Для обеспечения минимального разброса времени пробоя и получения минимального времени коммутации $P_{ст}$ следует минимизировать длительность фронта импульса управления и увеличивать его амплитуду. Для формирования импульса, удовлетворяющего этим требованиям, служит блок импульсов управления (см. рис. 3), работающий следующим образом.



Конденсатор C_{y1} заряжается от источника + 10 кВ как и стартовый накопитель $C_{ст.}$ Одновременно происходит заряд конденсатора C_{y2} от сети 220 В 50 Гц до 660 В. После окончания заряда всех трех указанных емкостей от блока синхронизации (на рис. 3 не приведен) поступает импульс управления на затвор IGBT – транзистора VT_y (IRGPH50UD). После включения последнего C_{y2} разряжается на первичную обмотку многовиткового (в первичной обмотке содержится 26 витков, во вторичной – 1450 витков) и.т. ИТ $_{y2}$. Импульс напряжения амплитудой ~35 кВ со вторичной обмотки ИТ $_{y2}$, пройдя через цепочку обострения $C_{об2}$ - $P_{об2}$, поступает на у.э. тригатрона P_{y1} . После его срабатывания C_{y1} разряжается на первичную обмотку маловиткового (в первичной обмотке – 3 витка, во вторичной – 15) трансформатора ИТ $_{y1}$ с низкой индуктивностью рассеяния. Индуцированный импульс амплитудой

~45 кВ со вторичной обмотки ИТ_{у1} поступает на цепочку обострения С_{об1}-Р_{об1}, где происходит укорочение фронта $t_{ф.у.}$ импульса управления до (10÷12) нс. Далее этот импульс через резистор R_{защ1} приходит на у.э. Р_{ст}.

Оценка времени запаздывания пробоя стартового разрядника.

Управляющий электрод размещен точно в середине рабочего зазора Р_{ст}, т.е. он находится на эквипотенциали, соответствующей половине зарядного напряжения С_{ст}. Обозначим зазор между основным положительным высоковольтным электродом и у.э. через a , а зазор между у.э. и вторым основным (имеющим потенциал земли через первичную обмотку ИТ₁) электродом – через b . До прихода управляющего импульса электрическое поле в рабочем зазоре Р_{ст} (т.е. в зазорах a и b) близко к однородному, его напряженность составляет 10 кВ/0,5 см=20 кВ/см.

Предположим, что потенциал у.э. изменяется мгновенно при подаче на него импульса управления. С приходом отрицательного управляющего импульса амплитудой 45 кВ к зазору a приложится напряжение (5+45) кВ, напряженность поля в зазоре составит 50 кВ/0,25 см = 200 кВ/см, то есть напряженность поля возрастет в 10 раз по сравнению с первоначальной. В зазоре b напряженность составит (+5-45) кВ/0,25 см = 160 кВ/см.

Напряженность поля E_y на кромке у.э. можно оценить по формуле [3]: $E_y \approx Ua^{-1}[(0,3a/r)+0,65]$, где r – радиус скругления кромки у.э. Для нашего случая $r = 0,15$ мм при $U = 10$ кВ получаем $E_y \approx 226$ кВ/см. Из-за наличия микроострий реально напряженность будет больше, как минимум, в 10 раз и существенно превысит 10^6 В/см [4]. В таких условиях с острых кромок у.э. одновременно в зазорах a и b начнется формирование лавин и стримеров и сформируются разрядные каналы, замыкающие в конечном итоге основные электроды Р_{ст}.

Оценим время запаздывания пробоя Р_{ст}. Коэффициент перенапряжения Π_a промежутка a : $\Pi_a = U_a/U_{0a}$, где U_a – амплитуда импульса, U_{0a} – постоянное напряжение неуправляемого пробоя зазора. Подставив численные значения, получим для промежутка a $\Pi_a = 6,66$, а для промежутка b $\Pi_b = 5,3$. Время запаздывания пробоя зазора a составит [5] $t_{па,нс} \approx 1,4/(\Pi_a-1)^2 = 0,043$ нс, соответственно зазора b – $t_{пб} \approx 0,076$ нс. Таким образом, суммарное расчетное время $t_{пр}$ запаздывания пробоя Р_{ст} составит $t_{пр} = t_{па} + t_{пб} = 0,119$ нс.

Реальное время t_n запаздывания пробоя Р_{ст} будет больше расчетного на длительность фронта $t_{ф.у.}$ импульса управления и время перезарядки межэлектродной емкости С_б у.э. на заземленный основной электрод.

Приближенная оценка показывает, что С_б ≈ 5 пФ. Оценим время перезарядки. Анализ параметров контура перезарядки С_б показывает, что в нем имеет место аperiодический процесс, то есть время перезарядки С_б максимально составит $t_{сб} = 3 R_{защ1} C_b = 3 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-12} = 15 \cdot 10^{-9}$ (с) = 15 нс. В итоге $t_n = t_{пр} + t_{ф.у.} + t_{сб} \approx 27$ нс.

Экспериментальные результаты. Проведенные эксперименты в процессе отладки генератора мегавольтных импульсов показали, что:

- экспериментально определенное время t_n запаздывания пробоя $P_{ст}$ не превышало 40 нс;
- разброс t_n находился в пределах от 0 до 8 нс;
- разброс времени прохождения сигнала по тракту блока импульсов управления $P_{ст}$ от момента подачи импульса управления на транзистор VT_y до момента прихода управляющего импульса на у.э. $P_{ст}$ составляет от 20 до 80 нс.

Полученные упомянутые временные интервалы и их разброс приемлемы для обеспечения работоспособности генератора.

На рис. 4 приведена осциллограмма импульса выходного напряжения стартовой ступени генератора. Стартовая ступень подключена к нелинейной нагрузке (на рис. 1 выделена штрих – пунктирной линией) – и.т. ИТ₁ с ферромагнитным сердечником из электротехнической стали 3422, причем к вторичной обмотке и.т. присоединена незаряженная емкость 0,15 мкФ. Как видно из осциллограммы, амплитуда импульса составила 8,8 кВ по сравнению с зарядным напряжением 9,6 кВ, то есть потери по амплитуде напряжения составила 8,3 %. Высокочастотные осцилляции на спаде импульса можно объяснить следующим образом. Примерно в течение 3,2 мкс после момента коммутации $P_{ст}$ происходит заряд емкости C_1 от вторичной обмотки ИТ₁, после чего на у.э. разрядника P_1 первой ступени повышения напряжения приходит управляющий импульс. Приход этого импульса и последующий пробой P_1 создают высокочастотные колебания в измерительном тракте, что и наблюдается на осциллограмме рис. 4.

Расшифровка осциллограммы выходного импульса дает следующие значения для разрядного контура стартовой ступени. Индуктивность $L_k = 190$ нГн, характеристическое сопротивление $z = 0,142$ Ом.

Исходя из этих значений, был проведен оценочный расчет времени τ_k коммутации $P_{ст}$. Расчет по формуле Дж.Ч.Мартина [4] показал, что индуктивная составляющая τ_L времени коммутации для обоих зазоров a и b равна ~19,5 нс, а резистивные составляющие τ_R соответственно для зазоров a и b равны 1,95 нс и 2,25 нс. Таким образом, время коммутации $P_{ст}$ составляет 43 нс.

Согласно осциллограмме (рис. 4) длительность фронта t_f выходного импульса напряжения стартовой ступени генератора по уровню 0,2 – 0,9 равна ~80 нс. Такое большое расхождение расчетного времени коммутации $P_{ст}$ и экспериментального значения t_f , зарегистрированного осциллографом серии TDS 7000 с полосой пропускания 7 ГГц, можно объяснить следующим образом. На развертке осциллографа с ценой деления 1 мкс/клетка стробоскопический режим работы осуществляется с периодом 20 нс. Таким образом, при расчетном времени коммутации 43 нс число выборки сигнала составит мак-

симум 3, а минимум – 2, что недостаточно для отражения реального фронта импульса.

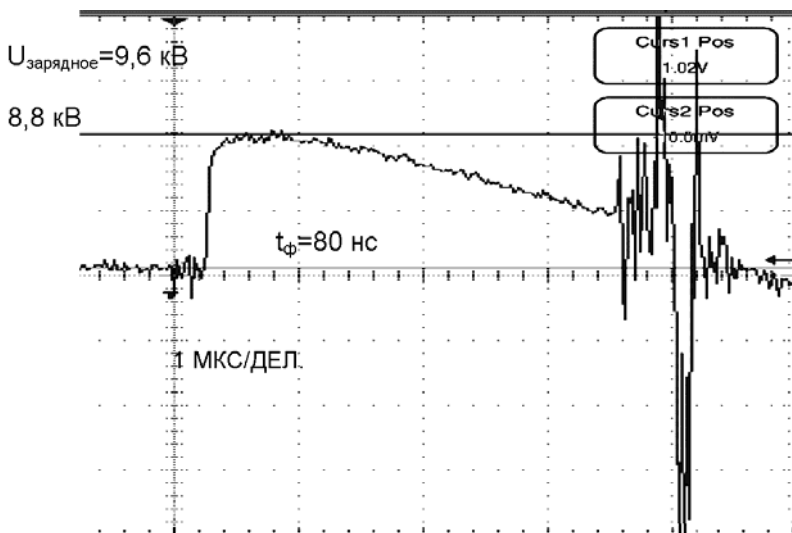


Рисунок 4 – Осциллограмма выходного импульса напряжения стартовой ступени генератора

Максимальная расчетная амплитуда разрядного тока через $P_{ст}$ в экспериментах составила: $I_{max} = U_{зар}/z = 67,6$ кА при максимальной скорости нарастания $5 \cdot 10^5$ А/с.

После ~800 срабатываний была произведена разборка $P_{ст}$. Его визуальный осмотр показал следующее. На рабочих поверхностях основных электродов видны незначительные следы эрозии в местах, противостоящих треугольным зубцам на внутренней кромке у.э. Три упомянутые зубца из восьми на у.э. были на одну треть высоты оплавлены. Часть изоляционной поверхности корпуса $P_{ст}$, которая расположена напротив рабочего зазора, была загрязнена продуктами эрозии электродов, хотя это и не сказывалось на работоспособности разрядника. Протирка ветошью, смоченной в ацетоне, позволила восстановить исходное состояние этой диэлектрической поверхности. Есть основание предположить, что $P_{ст}$ без нарушения работоспособности позволит произвести 10^4 срабатываний без замены электродов, но с протиркой внутренней изоляционной поверхности корпуса с периодичностью ~ 10^3 срабатываний.

Отличительными особенностями данной стартовой ступени генератора высоковольтных импульсов являются:

- коммутация запасенной энергии ступени в 1,25 кДж осуществляется

одним разрядником, что упрощает конструкцию, поскольку в случае использования нескольких параллельных разрядников возникает задача их синхронного включения;

- фронт импульса при коммутации накопителя $C_{ст}$ емкостью 25 мкФ (при этом эквивалентная емкость разрядной цепи составляет ~10 мкФ) на нелинейную нагрузку – импульсный трансформатор с ферромагнитным сердечником и с незаряженной емкостью во вторичной обмотке – не превышает 80 нс. Это позволило достичь амплитуды напряжения на первичной обмотке трансформатора $\sim 0,92 U_{зар}$.

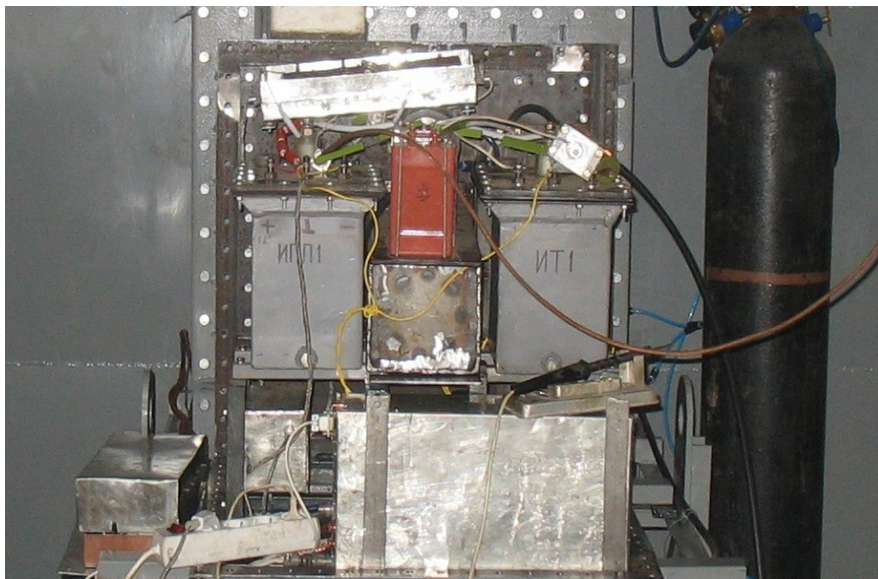


Рисунок 5 – Фотография стартовой ступени в составе генератора

Выводы. Впервые в схеме с трансформатором Тесла в цепи 3 – х витковой первичной обмотки этого трансформатора использован узел «емкостный накопитель – управляемый разрядник» с емкостью накопителя 25 мкФ и общей индуктивностью менее 20 нГн. Это позволило получить амплитуду тока в первичной обмотке трансформатора Тесла 67,6 кА с максимальной скоростью нарастания тока $\sim 5 \cdot 10^{10}$ А/с при зарядном напряжении 9,6 кВ и минимальных габаритах узла.

Автор выражает благодарность доктору технических наук Бойко Н.И. за советы и критику в процессе создания стартовой ступени генератора и подготовки рукописи.

Список литературы: 1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. –

49 с. 2. *Кремнев В.В., Месяц Г.А.* Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 137 с. 3. *Резвых К.А.* Расчет электростатических полей. – М.: Энергия, 1967. – 111 с. 4. *Герасимов А.И.* Многоканальные разрядники с лапельными управляющими электродами, их развитие и применение. – ПТЭ. – 2004. – № 1. – С. 7-8. 5. *Дайон М.И., Долгошеин Б.А., Ефременко В.И. и др.* Искровые камеры. – М.: Атомиздат, 1967. – 30 с.

Поступила в редколлегию 20.11.2007

УДК 621.373

А.И.ИВАНЬКИНА; НТУ «ХПИ»

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Метою даної роботи є розробка генератора з використанням високовольтного трансформатора, що дозволяє отримувати високовольтні імпульси до 20кВ з тривалістю 10мкс і частотою проходження імпульсів от 800 Гц до 1,5 кГц.

The purpose of this work is development of generator with the use of high-voltage transformer, that allows to get high-voltage pulses to 20 kV with duration of 10 μ s and pulse repetition frequency from 800 Hz to 1.5 kHz.

Высокие технологии, использующие электрохимические и электродинамические процессы в газах, реализуются при помощи высоковольтных импульсных установок.

По сравнению с 80-90 гг. прошлого столетия тенденция на улучшение эффективности работы установок связана с повышением быстродействия коммутрующих элементов и увеличением частотного диапазона. Важным требованием улучшения энергетических показателей электрофизических процессов является необходимость повышения крутизны фронта импульсов, так как это требование приводит к повышению напряженности электрического поля в разрядном промежутке и созданию благоприятных условий для зажигания разряда и ионизационных процессов. Также на энергетические показатели электрофизических процессов значительно влияет длительность импульса напряжения, воздействующего на разряд, т.к. кинетические процессы в газах при воздействии импульса происходят за время до единиц микросекунд, и при воздействии импульса, длительность которого превышает это время, в разрядном промежутке происходит нежелательный разогрев газа и электродной системы.

В связи с вышесказанным перед разработчиками высоковольтных им-